МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК.669.041 DOI 10.12737/10390

О взаимосвязи теплообмена и режима обжига при производстве извести во вращающейся печи*

А. А. Ансимов[1], Э. Э. Меркер[2], А. Ю. Кем[3]**
[1,2] Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, Российская Федерация
[3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

On heat exchange – burning conditions relation in manufacturing lime in a rotary kiln ***

A. A. Ansimov[1], E. E.Merker[2], A. Y. Kem[3]**
[1,2] Stary Oskol Technological Institute after A.A.Ugarov (NITU "MISiS" branch), Stary Oskol, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование влияния температурных условий режима обжига известняка во вращающейся печи на показатели качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве. Предложена методика изучения условий теплообмена и характера изменения температуры сыпучего материала при распространении теплоты и температурных волн в полуограниченном пространстве вращающейся печи. Показано, что система уравнений, описывающих граничные условия процесса нагрева известняка лучистым тепловым потоком, значительно усложняется в случае параллельно действующего конвективного теплообмена. Для упрощения расчетов предложено совместный лучистый и конвективный теплообмен свести к конвективному (по форме), используя известные критериальные зависимости. Представлены результаты исследования теплообмена в системе «факел — известняк» с определением эффективной и оптимальной температур в зоне обжига. Экспериментально в лабораторных и производственных условиях установлено воздействие температурного режима во вращающейся печи на показатели качества извести. Установлена обусловленность шлакового режима расходом извести при электроплавке стали в дуговой печи. Сформулированы выводы о влиянии параметров тепловой работы печи на основные технологические процессы обжига карбонатного сырья при производстве промышленной извести. Определены оптимальные условия температурного режима печи для производства качественной извести с содержанием более 90 % CaO.

Ключевые слова: режим обжига, вращающаяся печь, промышленная известь, качество, тепловой поток, критериальные зависимости, теплообмен, сталеплавильное производство, электроплавка, дуговая печь, шлакообразование.

The work objective is to study the effect of the temperature lime burning conditions in a rotary kiln on the quality indices of the industrial lime used in the steelmaking. The methodology for studying the heat transfer conditions and the temperature behavior of the bulk material under the heat passage and temperature-waves propagation in the semibounded space of a rotary kiln is offered. It is shown that a system of equations describing boundary conditions of the limestone heating by the radiant heat flux becomes increasingly complicated in the case of the parallel convective heat transfer. To simplify the calculations, it is suggested to reduce the combined radiant and convective heat transfer to the convective one (in form) using the known criterial dependences. The investigation results of the heat transfer in the ‘flame – limestone’ system with testing apparent and optimum temperatures in the burning zone are presented. The thermal effect in the rotary kiln on the lime quality indices is specified experimentally under the laboratory and plant conditions. Conditioning of the slag adjustment by the lime consumption during the steel electrosmelting in an arc furnace is defined. Conclusions on the effect of the furnace thermal performance on the principle processes of the carbonate raw materials kilning in the industrial lime manufacturing are formulated. The optimal furnace temperature conditions for manufacturing quality lime with more than 90% *CaO* are specified.

Keywords: burning conditions, rotary kiln, industrial lime, quality, heat flux, criterial dependences, heat exchange, steel industry, electrosmelting, arc furnace, slagging.

Введение. Получение стали стандартно-высокого качества обеспечивается технологиями плавки соответствующего уровня [1]. Шлакообразование в сталеплавильных печах и при наведении шлака в ковшах во время внепечной обра-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: ansimow@yandex.ru, merker@inbox.ru, akem@dstu.edu.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

http://vestnik.donstu.ru

ботки жидкой стали аргоном или азотом требует использования промышленной извести [2]. При этом основные технико-экономические показатели производства стали [3] во многом зависят от технологических решений по оптимизации расхода извести в процессе наведения шлака, а также от качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве. Эти показатели во многом зависят от температурных условий обжига известняка во вращающейся печи. Таким образом, исследование указанных условий, установление оптимальных режимов представляется важной научно-технической задачей.

Целью работы является исследование влияния температурных условий режима обжига известняка во вращающейся печи на показатели качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Исследования проводились на вращающихся печах обжига карбонатного сырья / известняка для получения промышленной извести, необходимой в металлургии. В частности, рассматривались производственные условия ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОЭМК) [4–5].

Действующая технология обжига во вращающейся печи предусматривает нагрев известняка до температур от 900 ºС до 1300 ºС. В этом случае происходит (с разной степенью интенсивности) термическая диссоциация исходного продукта по реакции: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$. При этом для полного разложения карбоната кальция с получением 1 кг CaO теоретически требуется 100,09/56,08 = 1,786 кг $CaCO_3$. Известно, что для разложения 1 кг $CaCO_3$ требуется 1780 кДж теплоты, следовательно, для получения 1 кг CaO потребуется $1780 \times 1{,}786 = 3185$ кДж теплоты.

Основные показатели работы печи (производительность по извести, расход сырья, удельный расход топлива) определяются условиями теплообмена и параметрами обжига — в частности, температурами обжига извести ($T_{о.м.}$, ºС), уходящих газов ($T_{ух.}$, ºС) и выгружаемой из печи извести ($T_{из.}$, ºС), а также скоростью и давлением/разряжением газов, химическим составом газов и известняка.

При заданной/постоянной производительности существует зависимость между качеством обожженного сырья и параметрами тепловой работы печи [6–8], в значительной мере определяемая развитием теплообмена в полуограниченном рабочем пространстве вращающейся печи.

Известно [9], что система уравнений, описывающих граничные условия процесса нагрева известняка лучистым тепловым потоком, значительно усложняется в случае параллельно действующего конвективного теплообмена. Для упрощения расчетов предложено совместный лучистый и конвективный теплообмен свести к конвективному (по форме), используя известные критериальные зависимости.

Для изучения влияния условий теплообмена на характер изменения температуры сыпучего материала (карбонатного сырья) в печи использовали следующие критериальные зависимости:

$$B_о = (q \times G) / (\sigma_о \times \varepsilon \times T_г^4 \times F);$$
$$C_к = (Re^{0,8} \times \lambda \times L \times T_г) / (q \times G); \qquad (1)$$
$$W = q / (c \times m_{ср} \times T_г),$$

где $B_о$ — критерий Больцмана; $C_к$ — энергетический критерий, учитывающий эффективность расхода газа в условиях конвективного теплообмена; $Re = \omega \times D/\upsilon$ (критерий Рейнольдса): ω — скорость газа в печи, м/с; D и L — диаметр и длина зоны горения в печи, м; υ — кинематическая вязкость газа, м/с^2, λ — коэффициент теплопроводности газа (1,630 Вт /(м·град. К); W — величина, характеризующая соотношение между падением температуры газа (после факела) и подъемом температуры материала ($T_м \rightarrow$ max) в условиях противотока газа в печи; q — удельный расход тепла, кДж/кг; G — производительность печи, кг/ч; $\sigma_о$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε — приведенная степень черноты; $T_г$ — теоретическая температура горения, К; F — поверхность теплообмена, м^2; c — средняя теплоемкость материала в печи (1,1 кДж/(кг × град. К); $m_{ср}$ — средний удельный расход сырья в печи, кг/кг.

Проведенными исследованиями между конечным содержанием (CaO, %) в извести и критериями $B_о$ и W достоверных взаимосвязей не установлено, несмотря на то, что конвективная составляющая ($C_к$) процесса оказывает меньшее влияние на зону обжига с максимальной излучательной способностью факела. В этой связи представляется целесообразным ввести в качестве дополнительного параметра критерий качества обожженной извести в виде: $K_{CaO} = T_{м(опт.)} / T_{эф}$. Данное выражение представляет отношение оптимальной температуры ($T_{м(опт.)}$,ºС) обжига материала (известняка) к усредненной (эффективной) температуре ($T_{эф}$, ºС) в зоне обжига печи. При этом $T_{м(опт.)} / T_{эф.} > 1$ наступает процесс пережога материала, а при $T_{м(опт.)} / T_{эф.} < 1$ имеет место недопал (недожог).

Из критериального выражения (1) для величины W находим: $q = W \times c \times m_{ср} \times T_г$. Подставив значение q в выражение для $B_о$ получим:

$$B_о = W\,[(c \times m_{ср} \times G) / (\sigma_о \times \varepsilon \times T_г^3 \times F)]. \qquad (2)$$

Из анализа выражения (2) следует, что при сужении зоны обжига в печи, повышении $m_{ср}$ и $T_г$, стремлении величины W к максимуму растет значение $B_о$, а это способствует увеличению параметров q и G работы печи, что согласуется с данными [6–8].

Обработка опытных данных по обжигу известняка во вращающейся печи позволила получить зависимость $T_{м(опт.)} / T_{эф.} = B_о \times W^{-1,73}$, учитывающую подогрев воздуха для горения топлива с заданным коэффициентом расхода, нагрев известняка отходящими газами в подогревателе и возврат пыли в печь.

Эффективную температуру ($T_{эф}$,°С) в зоне обжига печи находили по уравнению в виде:

$$T_{эф.} = [(\eta_{КПД} \times T^2_{кал.} + T^2_{м.})\ (T^2_{ух.} - T^2_{м.})]^{0,25}, \quad (3)$$

где $\eta_{КПД}$ — значение КПД печи; $T_{кал}$ — калориметрическая температура горения топлива, ^{0}С; $T_{ух}$ — температура уходящих из зоны обжига газов, ^{0}С; $T_м$ — температура материала (извести) на выходе из печи, ^{0}С.

Таким образом, представляется возможным определить температурный уровень $T_{м(опт.)}$ нагрева известняка в зоне обжига вращающейся печи. С помощью компьютерной программы *STINITUMISIS* проведен расчет $T_{эф}$ и K_{CaO} с учетом данных по критериям $B_о$, $C_к$, W. Кроме того, проанализированы результаты обжига сырья с оценкой эффективности теплообмена при работе вращающейся печи по теплотехнологическим показателям (q, G, $\eta_{к.п.д}$, $T_г$ и др.). Обработка данных функционирования вращающейся обжиговой печи в цехе обжига извести (ЦОИ) ОАО «ОЭМК» подтвердила влияние указанных факторов на эффективную температуру в рабочем пространстве агрегата при различных значениях коэффициента теплопередачи.

Приведенные на рис. 1 данные характеризуют взаимосвязь $T_{эф}$ с параметрами технологического процесса обжига карбонатного сырья при производстве извести во вращающейся печи, а именно зависимость $\tau_{дис.}$:

— от эффективной температуры ($T_{эф}$,^{0}С) в зоне обжига известняка при различных значениях коэффициентов теплопередачи k, Вт/(м^2·К);

— от потока газа теплоносителя (азот, скорость потока 0,055м/с) к поверхности материала.

Кроме того, представленные данные иллюстрируют характер зависимости $T_м/T_{эф.} = f\ (B_о;\ W)$, учитывающей соотношение падения температуры в конце факела газа и подъема температуры материала при противотоке в печи, вследствие протекания экзотермических реакций в потоке известняка.

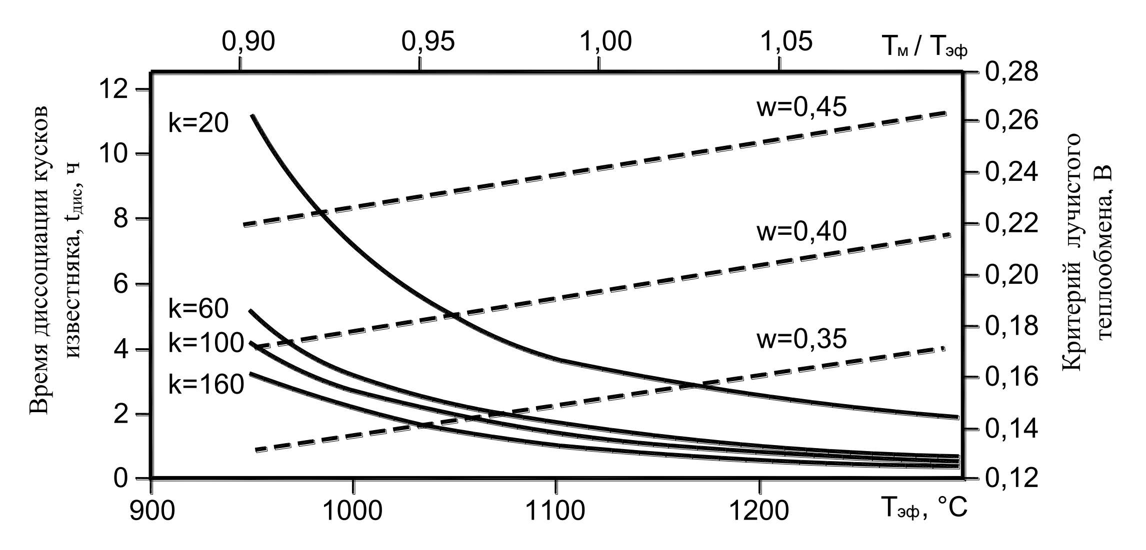


Рис. 1. Взаимосвязь параметров технологического процесса обжига карбонатного сырья

На основании полученных данных можно сделать следующий вывод. Для производства качественной извести [4, 5] режим обжига известняка во вращающейся печи должен обеспечивать:

— требуемую производительность агрегата;

— пониженный удельный расхода тепла;

— рациональный предел конечной температуры извести $T_{из.(в)}$,°С на выходе из печи при входе ее в холодильник агрегата [10].

Установлен характер влияния параметров температурного режима (рис. 2) в агрегате на свойства извести. При этом в качестве основы использован анализ данных:

— о работе вращающихся печей обжига известняка в ЦОИ ОАО «ОЭМК»;

— о проведенных лабораторных исследованиях.

http://vestnik.donstu.ru

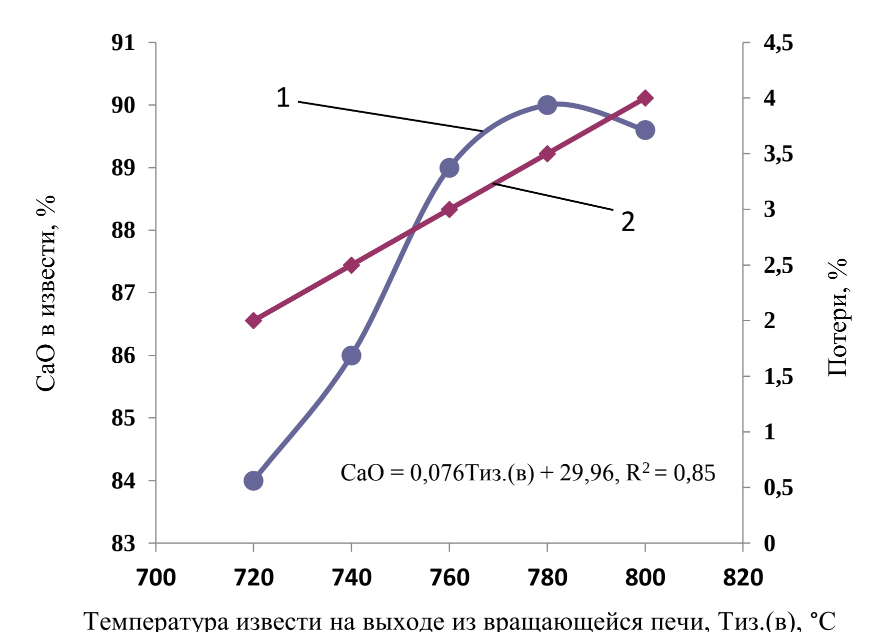


Рис. 2. Влияние температуры извести на содержание *CaO* (кривая 1) и потери при прокаливании (кривая 2)

Содержание *CaO* в извести достигает экстремума (более 90 %) (рис. 2, кривая 1) при температуре извести на выходе из вращающейся печи, $T_{\text{из.(в)}}$, равной примерно 780–800 ºС. Допустимые потери при прокаливании (ППП) в извести — около 4 % (рис. 2, кривая 2).

Проведенное исследование позволило установить (рис. 3, кривая 1) четкую зависимость, указывающую на достоверность взаимосвязи температуры извести на выходе из вращающейся печи $T_{\text{из(в)}}$ и температуры известняка в зоне обжига агрегата:

$$T_{\text{из-к(о)}} : T_{\text{из.(в)}} = 0{,}3945 T_{\text{из-к(о)}} + 322{,}17;\ R^2 = 0{,}61.$$

Это позволяет осуществлять контроль содержания *CaO* в извести.

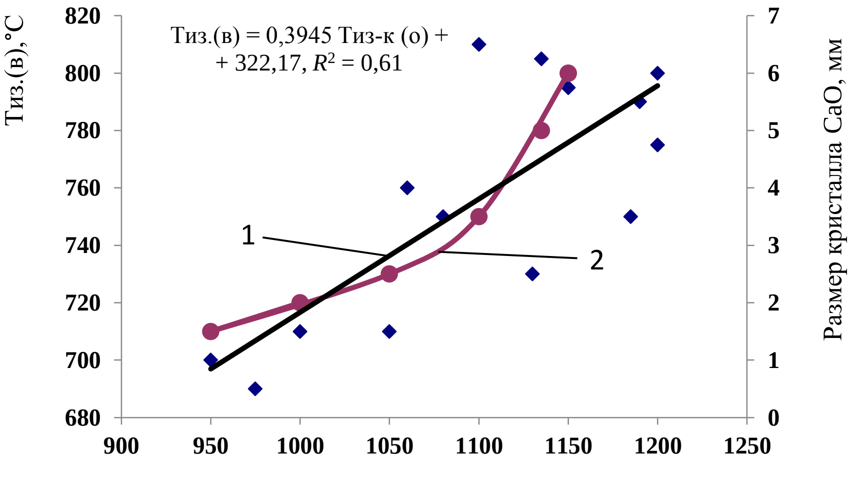


Рис. 3. Влияние температуры обжига на температуру извести на выходе из вращающейся печи (Тиз.(в) ºС) (кривая 1) и размер кристаллов *CaO*, (М, мм) (кривая 2)

Установлено также влияние температуры обжига известняка ($T_{из\text{-}к.(о)}$,°С) на размеры кристаллов CaO (рис. 3, кривая 2) после обжига материала.

При определении оптимального расхода извести [2] в процессе электроплавки металлизованных окатышей в дуговой печи исходили из накапливающейся массы шлака ($G_{шл}$, кг) с учетом образующегося оксида железа (FeO) по формуле:

$$G_{шл.} = G_{шл.(0)} + (V_{ок.} \times В/100 + V_{(FeO)} + V_{изв.}) \times (\tau - \tau_0), \qquad (4)$$

где $G_{шл.(0)}$ — количество шлака в печи в момент начала (τ_0, с) подачи окатышей в ванну, кг; $V_{ок}$ — расход окатышей, кг/с; В — содержание пустой породы в окатышах (CaO и SiO_2), %; $V_{(FeO)}$ — суммарная скорость образования (FeO) в шлаке, кг/с; $V_{изв.}$ — скорость подачи извести в печь, кг/с; τ_0 и τ — начальное и текущее время по ходу плавки, с.

По ходу плавки окатышей необходимо поддерживать оптимальный уровень основности шлака ($B = CaO/SiO_2$), подавая в печь соответствующее количество извести [3]. Для расчета из выражения (4) распишем массы CaO и SiO_2 в следующем виде:

$$CaO = (CaO)_0 + (V_{ок.} \times CaO_{ок.}/100 + V_{изв.}) \times (\tau - \tau_0), \qquad (5)$$

$$SiO_2 = (SiO_2)_0 + (V_{ок.} \times (SiO_2)_{ок.}/100 + V_{изв.}) \times (\tau - \tau_0), \qquad (6)$$

где $CaO_{ок.}$ и $(SiO_2)_{ок.}$ — содержание этих оксидов в окатышах, кг; $(CaO)_0$ и $(SiO_2)_0$ — начальная масса этих оксидов в шлаке перед подачей окатышей в печь, кг.

Одновременное решение выражений (5) и (6) позволяет получить величину оптимальной скорости подачи извести в дуговую печь по ходу электроплавки окатышей:

$$V_{изв.(опт)} = (B \times (SiO_2)_{ок} - CaO_{ок}) \times V_{ок}/100 + (B \times (SiO_2)_0 - (CaO)_0)/(\tau - \tau_0). \qquad (7)$$

Таким образом, использование выражения (7) обеспечивает оптимальный расход извести, помещаемой в ванну дуговой печи. Это позволяет:

— экономить известь при электроплавке окатышей;

— воздействовать на интенсификацию процесса шлакообразования, ускорение процессов десульфурации и дефосфорации металла.

Таким образом, повышается производительность печи и улучшается качество стали.

Оптимизация же температурного режима обжига известняка во вращающейся печи влияет на содержание CaO в извести и, следовательно, на конечные показатели электроплавки стали.

Выводы:

1. Установлены закономерности влияния параметров тепловой работы печи на основные технологические процессы обжига карбонатного сырья при производстве промышленной извести. Показано, что система уравнений, описывающих граничные условия процесса нагрева известняка лучистым тепловым потоком, значительно усложняется в случае параллельно действующего конвективного теплообмена. Для упрощения расчетов предложено совместный лучистый и конвективный теплообмен свести к конвективному (по форме), используя известные критериальные зависимости.

2. Предложено критериальное уравнение зависимости показателей качества извести от критерия B_0 и числа W, позволяющее определять оптимальную температуру в зоне обжига печи в зависимости от условий производства. Определены оптимальные условия температурного режима печи для производства качественной извести с содержанием более 90 % CaO. Установлена четкая корреляция $T_{из.(в)} = 0{,}3945T_{из\text{-}к(о)} + 322{,}17$; $R^2 = 0{,}61$. Она указывает на достоверность взаимосвязи температуры извести на выходе из вращающейся печи $T_{из.(в)}$, °С и температуры известняка в зоне обжига агрегата $T_{из\text{-}к(о)}$, °С. Изучены закономерности влияния показателей качества извести на интенсификацию процессов шлакообразования при электроплавке стали. Предложена методика, позволяющая оптимизировать присадки извести и улучшить в целом показатели процесса электроплавки стали.

Библиографический список

1. Сталь на рубеже столетий / под ред. Ю. С. Карабасова. — Москва : МИСиС, 2001. — С. 664.

2. Исследование роли извести при шлакообразовании и внепечной обработке стали инертными газами / Д. А. Бахаев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 7/8 (75). — С. 35–42.

http://vestnik.donstu.ru

3. Кем, А. Ю. К вопросу об оптимизации выплавки стали в дуговой печи и ее внепечной обработки в агрегате «ковш-печь» / А. Ю. Кем, В. О. Казарцев, Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 66–71.

4. Нехлебаев, Ю. П. Экономия топлива при производстве извести / Ю. П. Нехлебаев. — Москва : Металлургия, 1987. — 136 с.

5. Бергауз, А. Л. Повышение эффективности сгорания топлива в печах / А. Л. Бергауз, Э. И. Розенфельд. — Ленинград : Недра, 1984. — 175 с.

6. Меркер, Э. Э. Совершенствование методики контроля параметров режима сжигания топлива во вращающихся печах / Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов, А.А. Ансимов // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. — 2011. — № 7. — С. 78–81.

7. Антонов, Г. Л. Особенности эксплуатации коротких вращающихся печей обжига известняка / Г. Л. Антонов // Сталь. — 2008. — № 9. — С. 97–99.

8. Гамей, А. И. Освоение технологии обжига известняка во вращающихся печах / А. И. Гамей // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. — 2002. — № 6. — С. 3–5.

9. Фокин, В. М. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена / В. М. Фокин, Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. — Москва : Машиностроение, 2005. — С. 143.

10. Меркер, Э. Э. Повышение эффективности сжигания топлива во вращающихся печах обжига извести / Э. Э. Меркер, Т. В. Агаркова, В. В. Губин // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. — 1995. — № 5. — С. 28–30.

References

1. Karabasov, Y. S., ed. Stal' na rubezhe stoletiy. [Steel at the turn of the century.] Moscow: MISSiS, 2001, 664 p. (in Russian).

2. Bakhayev, D. A., Kochetov, A. I., Kem, A. Y., Ansimov, A. A Issledovanie roli izvesti pri shlakoobrazovanii i vnepechnoy obrabotke stali inertnymi gazami. [Investigation of the role of lime under slagging and inert-gas secondary steel refining.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 7/8(75), pp. 35-42 (in Russian).

3. Kem, A. Y., Kazartsev, V. O., Merker, E. E., Kharlamov, D. A. K voprosu ob optimizatsii vyplavki stali v dugovoy pechi i ee vnepechnoy obrabotki v agregate «kovsh-pech'». [Optimization of steelmaking in electric arc furnace and ladle treatment in the ladle-furnace] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2(77), pp.66-71 (in Russian).

4. Nekhlebayev, Y. P. Ekonomiya topliva pri proizvodstve izvesti. [Fuel saving in lime manufacturing.] Moscow: Metallurgiya, 1987, 136 p. (in Russian).

5. Berghaus, A. L., Rosenfeld, E. I. Povyshenie effektivnosti sgoraniya topliva v pechakh. [Improving the furnace fuel efficiency.] Leningrad: Nedra, 1984, 175 p. (in Russian).

6. Merker, E. E., Kharlamov, D. A., Ansimov, A. A. Sovershenstvovanie metodiki kontrolya parametrov rezhima szhiganiya topliva vo vrashchayushchikhsya pechakh. [Improving the parameter checking technique of fuel combustion conditions in rotary kilns.] Chernaya metallurgiya. NTI Bull., 2011, no. 7, pp. 78-81 (in Russian).

7. Antonov, G. L. Osobennosti ekspluatatsii korotkikh vrashchayushchikhsya pechey obzhiga izvestnyaka. [Special operation features of short rotary lime-burning kilns.] Steel, 2008, no. 9, pp. 97-99 (in Russian).

8. Gamey, A. I. Освоение технологии обжига известняка во вращающихся печах. [Development of limestone burning technology in rotary kilns.] Chernaya metallurgiya. NTI Bull., 2002, no.6, pp. 3-5 (in Russian).

9. Fokin, V. M., Boykov, G. P., Vidin, Y. V. Osnovy energosberezheniya v voprosakh teploobmena. [Fundamentals of heat energy saving issues.] Moscow: Mashinostroenie, 2005, 143 p. (in Russian).

10. Merker, E. E, Agarkova, T. V., Gubin, V. V. Povyshenie effektivnosti szhiganiya topliva vo vrashchayushchikhsya pechakh obzhiga izvesti. [Improving the furnace fuel efficiency in rotary lime-burning kilns.] Chernaya metallurgiya. NTI Bull., 2005, no. 5, pp. 28-30 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.09.2014
Сдана в редакцию 09.09.2014
Запланирована в номер 28.01.2015